

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

## **Belzner, Fabian; Gebhardt, Michael; Pfrommer, Udo; Eisenhauer, Norbert Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Dimensionierung einer Jambor-Schwelle auf Basis von Modelluntersuchungen**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische  
Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103575>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Belzner, Fabian; Gebhardt, Michael; Pfrommer, Udo; Eisenhauer, Norbert (2012):  
Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Dimensionierung einer Jambor-Schwelle auf  
Basis von Modelluntersuchungen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau  
und technische Hydromechanik (Hg.): Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben. Dresdner  
Wasserbauliche Mitteilungen 47. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für  
Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 463-472.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



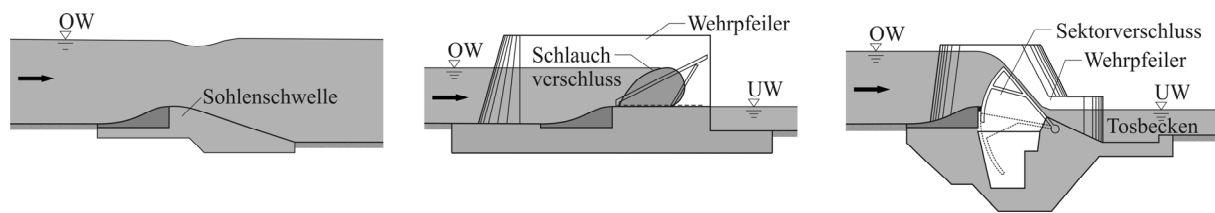
# **Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Dimensionierung einer Jambor-Schwelle auf Basis von Modelluntersuchungen**

Fabian Belzner  
Michael Gebhardt  
Udo Pfrommer  
Norbert Eisenhauer

Jambor-Schwellen sind feste Wehrschwellen, die auf Grund ihrer hydraulisch optimierten Form einen geringeren Aufstau nach Oberwasser erzeugen als herkömmliche Wehrschwellen. Sie eignen sich besonders bei beweglichen Verschlüssen. Vor dem Hintergrund steigender Stahlpreise und hoher Anforderungen an die Hochwasserneutralität kann die Bauhöhe des beweglichen Verschlusses bei nahezu gleichbleibender hydraulischer Leistungsfähigkeit reduziert werden. Obwohl Jambor-Schwellen seit Jahren in Verbindung mit beweglichen Verschlüssen zur Anwendung kommen, ist der direkte Zusammenhang zwischen der Schwellenhöhe, den Ober- und Unterwasserrandbedingungen, so wie dem sich ergebenden Aufstau bis heute nicht systematisch untersucht worden. Auf Grundlage von Modellversuchen wurde ein dimensionsloses Bemessungsdiagramm erarbeitet, das es erlaubt, den Aufstau schon in der Planungsphase abzuschätzen, um so eine möglichst hohe Wehrschwelle bei optimaler hydraulischer Leistungsfähigkeit der Wehranlage zu erzielen.

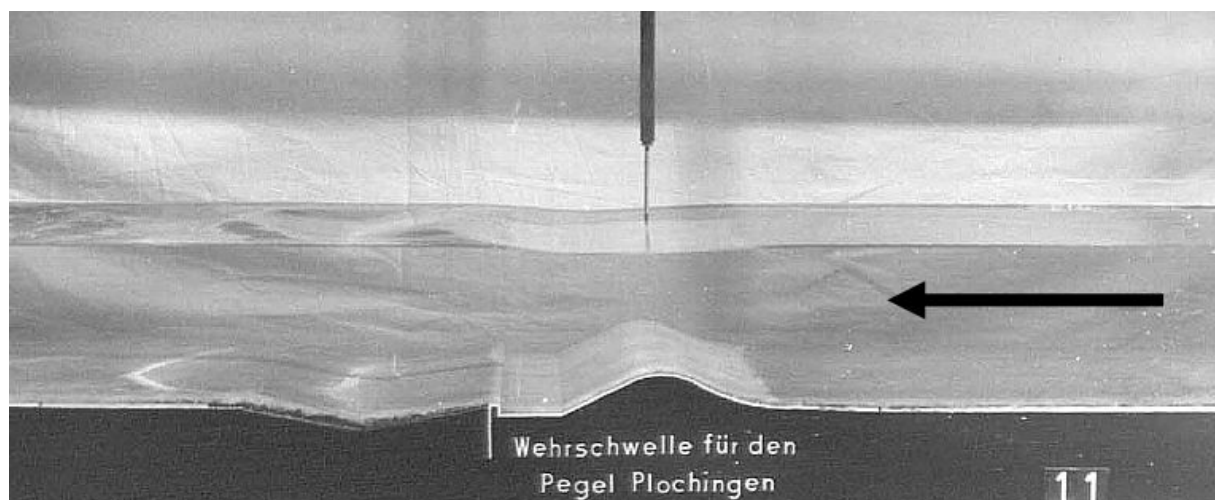
## **1 Einleitung**

Wehranlagen sind Kontrollbauwerke, die durch eine Einengung des Fließquerschnitts oder eine Anhebung der Gewässersohle Einfluss auf Wasserstand und Abfluss nehmen, um so den Anforderungen der Schifffahrt, der Energieversorger und der Anlieger gerecht zu werden. Wehranlagen bestehen dabei im Allgemeinen aus einer festen Wehrschwelle und einem oder mehreren beweglichen Verschlüssen. Durch den Einbau einer Wehrschwelle wird die Bauhöhe der beweglichen Verschlüsse reduziert (Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Bewegliche Verschlussstypen mit Jambor-Schwelle

*Lauffer (1936)* leitete die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung von Strömungen in gekrümmten Kanälen her und zeigte dabei, dass auf Wasserteilchen, die konvex gekrümmten Stromlinien folgen, neben den Massen- und Geschwindigkeitskräften auch die Zentrifugalkraft wirkt, was eine Minderung des inneren Wasserdrucks gegen die Sohle zur Folge hat. Nach dem Energiesatz von Bernoulli wird diese Druckhöhendifferenz in Geschwindigkeitshöhe umgewandelt, was zu einer Beschleunigung der Strömung führt. *Jambor (1959)* griff diese Erkenntnis auf und führte Versuche durch, um optimale Krümmungsradien zu finden (Abbildung 2). Anfänglich realisierte Jambor-Schwellen in Ellgau an der Lech oder Offenbach am Main verfügten zunächst über eine vollständig konvexe Ausrundung ohne Übergang zur Sohle. Bei der Planung der Staustufe Trier an der Mosel wurde erstmals ein konkaves Übergangsstück zwischen Sohle und Konvexkrümmung untersucht, in Folge dessen eine Strömungsablösung beim Übergang von Sohle zum Wehrhöcker vermieden werden konnte, was eine deutliche Verringerung des Aufstaus zur Folge hatte und die abgelagerungsfreie Geschiebeabfuhr über die Schwelle ermöglichte. Abbildung 2 zeigt die für den Pegel Plochingen untersuchte Schwelle.



**Abbildung 2:** Untersuchung einer Wehrschwelle für den Pegel Plochingen (BAW, 1960)

*Jambor (1959)* stellte klare Konstruktionsregeln für die Gestaltung der Wehrschwelle auf (Abbildung 4) und fand heraus, dass die Höhe der Wehrschwelle 25 bis 30 % der Oberwassertiefe betragen kann, ohne dass sich ein „merkbarer Aufstau“ nach Oberwasser ergibt.

Obwohl die von Jambor entwickelte Schwellenform in der Vergangenheit zusammen mit den verschiedensten beweglichen Verschlüssen wie Sektor-, Klappen oder Schlauchwehren, u.a. an Mosel, Saar und Aller, realisiert wurde, liegen bis heute keine allgemeingültigen Aussagen vor, die es erlauben, die Höhe der Wehrschwelle unter verschiedenen hydraulischen Randbedingungen festzulegen. Insbesondere vor dem Hintergrund der heutigen Anforderungen an Hochwasserneutralität werden in den meisten Fällen quantitative Aussagen über den „merkbareren Aufstau“ erwartet. Systematische Untersuchungen an einem physikalischen Modell bilden die Grundlage für die Entwicklung einer allgemeingültigen Methode, die es dem praktischen Ingenieur erlaubt, die Höhe einer Jambor-Schwelle und des Aufstaus im Oberwasser zu ermitteln.

## 2 Allgemeine Betrachtungen

### 2.1 Strömung über eine Wehrschwelle

Im Hochwasserfall herrscht bei vollständig geöffneten Verschlüssen in der Regel strömender Abfluss im Bereich der Wehranlage, was eine Grundvoraussetzung für die Funktion der Jambor-Schwelle ist (*Jambor, 1959*). Die maximale Höhe  $w$  der Wehrschwelle kann über die Bernoullische Energiegleichung ermittelt werden. Bei maximaler Schwellenhöhe  $w_{\max}$  stellt sich bei vorgegebenem spezifischem Abfluss  $q$  auf dem Rücken der Schwelle gerade die Grenzabflusstiefe  $y_{\text{gr}}$  ein. Das bedeutet, dass die Summe aus Schwellenhöhe  $w$  und mindestens erforderlicher spezifischer Energiehöhe  $H_{\min}$  nicht größer als die Energiehöhe in der Anströmung  $H_1$  sein darf. Bei einer verlustfreien Betrachtung kann stattdessen auch die Energiehöhe  $H_2$  eingesetzt werden, so dass sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$w_{\max} \leq H_2 - H_{\min} = H_2 - \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (1)$$

Über die Kontinuitätsgleichung und die Einführung der Froude-Zahl  $Fr_2$  kann Gl. (1) in folgender Form dargestellt werden:

$$\frac{w_{\max}}{y_2} \leq 1 + \frac{Fr_2^2}{2} - \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{Fr_2^2} \quad (2)$$

$w_{\max}$	[m]	max. Schwellenhöhe
$H_2$	[m]	spezifische Energie der Abströmung
$y_2$	[m]	Unterwasserstand
$Fr_2$	[-]	Froude-Zahl im Unterwasser
$q$	[m <sup>2</sup> /s]	spezifischer Abfluss
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung

Eine ausführliche Herleitung ist u. a. Jirka & Lang (2009) zu entnehmen.

Überschreitet die Schwellenhöhe  $w$  die maximale Schwellenhöhe  $w_{\max}$  nach Gl. 2, geht die Abflusskontrolle auf die Schwelle über. Der Oberwasserstand wird unabhängig vom Unterwasserstand und ist eine Funktion der Anströmung. Die Abflusscharakteristik über die Jambor-Schwelle ähnelt dann der eines vollständigen Überfalls über ein breitkroniges Wehr mit parallelen Stromlinien auf der Schwelle, wie unter anderem in *Hager & Schwalt (1994)* oder in jüngerer Zeit von *Heimann (2009)* beschrieben.

### 3 Modelluntersuchungen

#### 3.1 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die für den Modellversuch zur Verfügung stehende Versuchsrinne (Abbildung 3) hatte eine Nutzlänge von etwa 15,00 m und eine Breite von 2,33 m. Die Höhe der Rinne betrug von der Sohle bis zur Oberkante 0,57 m. Über die Rinne verteilt wurden sechs Messpunkte in Abständen von 1,25 m bis 2,00 m festgelegt, die über das Prinzip der kommunizierenden Röhren mit Ultraschall-Wasserspiegelmessgeräten verbunden waren. Die Messung des Zuflusses erfolgte über eine magnetisch-induktive-Durchflussmessung, der Unterwasserstand wurde mittels einer elektronisch verstellbaren Klappe reguliert.



**Abbildung 3:** Versuchsrinne im Labor der Bundesanstalt für Wasserbau

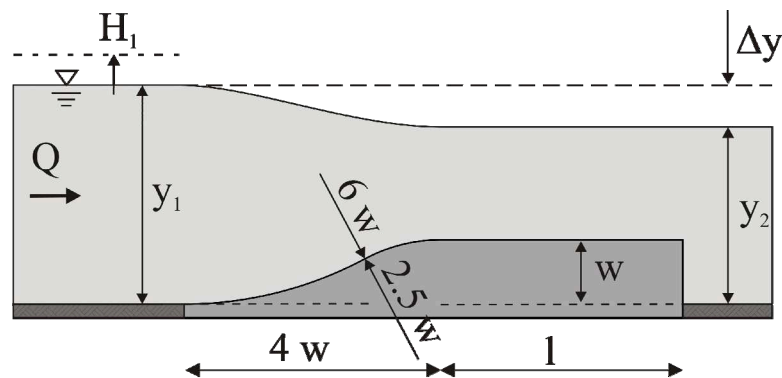
### 3.2 Konzeption der Modelluntersuchung

Eine Grundvoraussetzung für die ähnliche Darstellung von Ablösevorgängen und deren Einfluss auf die Strömung im Froudeschen Modell ist, dass die Schwerkraft und die Trägheitskraft gegenüber dem Einfluss der zähen Reibung überwiegen. Nach *Jirka & Lang (2010)* kann der Einfluss der zähen Reibung ab einer Reynoldszahl von 500 vernachlässigt werden. Alle im Modell auftretenden Reynoldszahlen lagen im Bereich von 6000 bis 120000 und damit deutlich über dieser Grenze.

Der Aufstau durch eine Schwelle kann durch die Wasserspiegeldifferenz  $\Delta y = y_1 - y_2$  beschrieben werden (Abbildung 4), eine Dimensionsanalyse führte zu folgenden relevanten Einflussgrößen:

$$\frac{\Delta y}{w} = f(\text{Fr}_2, \frac{y_2}{w}) \quad (3)$$

$\Delta y$	[m]	Aufstau $\Delta y = y_1 - y_2$
$w$	[m]	Höhe der Jambor-Schwelle
$\text{Fr}_2$	[-]	Froude-Zahl der Abströmung
$y_1$	[m]	Wassertiefe im Oberwasser
$y_2$	[m]	Wassertiefe im Unterwasser



**Abbildung 4:** Überströmung einer Jambor-Schwelle – Definitionsskizze

### 3.3 Durchgeführte Versuchsreihen

Im Modell wurden fünf verschiedene Schwellen mit Höhen zwischen 2,9 cm und 14,3 cm untersucht. Zu jeder Schwelle wurden sieben Unterwasserstände zwischen 5,7 cm und 40,0 cm sowie 16 Durchflüsse von 19,5 l/s bis 312,2 l/s betrachtet. Dadurch ergaben sich pro Schwelle 112, insgesamt etwa 560 Zustände. Für Referenzmessungen ohne Jambor-Schwelle wurde ein Spektrum aus sieben Unterwasserständen in Kombination mit 16 Abflüssen betrachtet. Um den Einfluss unterschiedlicher Gesamtlängen zu untersuchen, wurden für die Schwelle mit der Höhe von 14,3 cm weitere Versuche mit drei unterschiedlich Längen (0 cm, 59 cm und 118 cm) durchgeführt.

## 4 Ergebnisse der Modelluntersuchung

### 4.1 Reibungseinflüsse

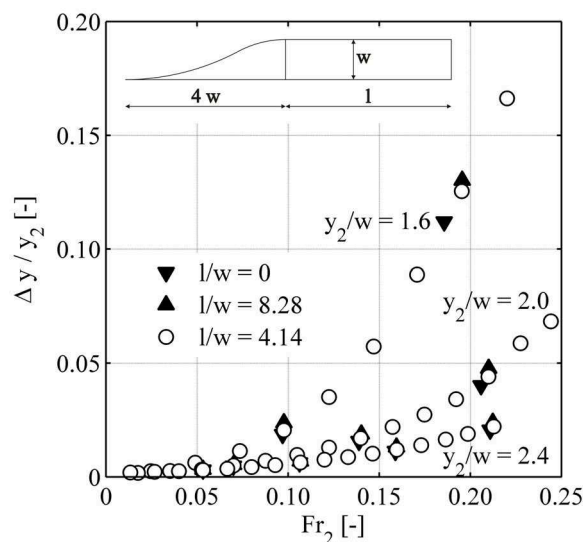
Um den Reibungswiderstand der Versuchsrinne zu bestimmen, wurden Referenzmessungen durchgeführt. Die Auswertung ergab, dass die äquivalente Sandrauheit  $k_s$  der Versuchsrinne in Abhängigkeit von der Froude-Zahl zwischen 0,5 mm und 3,5 mm lag. Nach der Klassifizierung des *DVWK-Merkblattes 220 (1991)* entspricht dies einem glatten Beton, was mit den Gegebenheiten in der Versuchsrinne übereinstimmte.

### 4.2 Einfluss der Ablagetischlänge

Auf Grund der in jüngster Zeit realisierten Wehranlagen lag der Fokus der Untersuchungen auf der Jambor-Schwelle in Verbindung mit einem Schlauchver-

schluss. Wassergefüllte Schlauchwehre benötigen im abgelegten Zustand eine Ablagetischlänge, die der 2,3-fachen Schlauchhöhe entspricht (*Gebhardt, 2006*). Bei konstantem Oberwasserstand  $y_1$  verkürzt sich die Länge  $l$  des Ablagetischs infolgedessen mit zunehmender Höhe  $w$  der Jambor-Schwelle.

In Abbildung 5 ist der dimensionslose Aufstau  $\Delta y/y_2$  für drei Ablagetischlängen  $l/w$  über der Froude-Zahl  $Fr_2$  dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Länge des Ablagetischs praktisch keinen Einfluss hat und die Schwellenhöhe  $w$  damit die dominierende Einflussgröße bleibt. Die Untersuchungsergebnisse gelten somit nicht nur für Jambor-Schwellen an Schlauchwehren, sondern auch für andere (in Abbildung 1) dargestellte Verschlussstypen. Das gilt allerdings nicht für den vollkommenen Überfall.

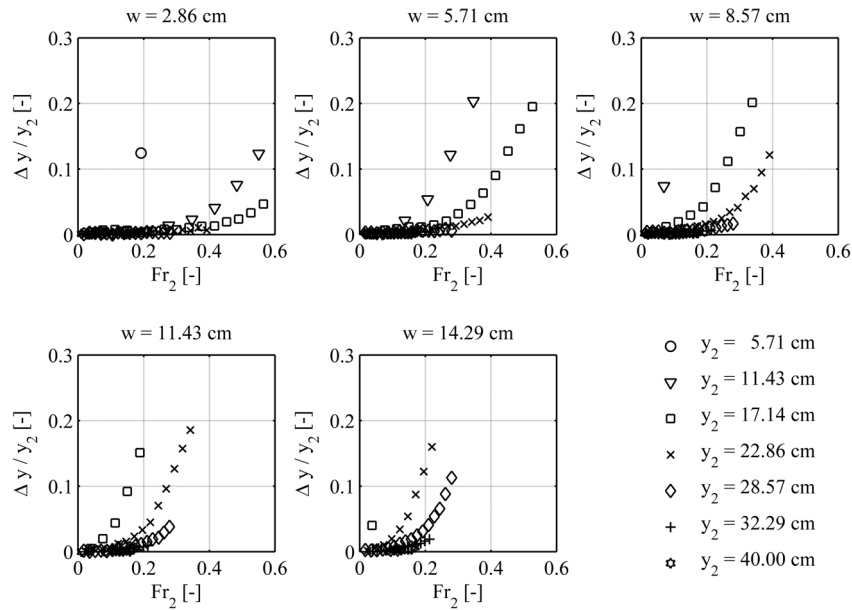


**Abbildung 5:** Einfluss der Ablagetischlänge bei verschiedenen Unterwasserständen in Abhängigkeit von der Froude-Zahl  $Fr_2$

#### 4.3 Einfluss der Schwellenhöhe und Gegenüberstellung der Ergebnisse

In Abbildung 6 ist der dimensionslose Aufstau  $\Delta y/y_2$  gegenüber der Froude-Zahl  $Fr_2$  dargestellt.



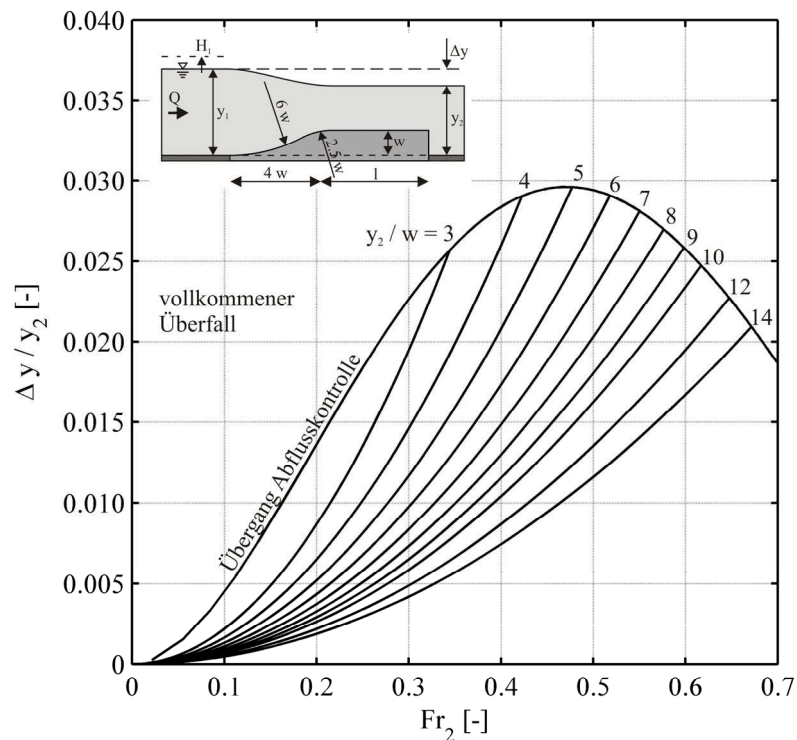


**Abbildung 6:** Aufstau  $\Delta y/y_2$  in Abhängigkeit von der Froude-Zahl  $Fr_2$

Der Vergleich der Ergebnisse für die einzelnen Schwellen zeigt, dass der Aufstau  $\Delta y/y_2$  durch eine Funktion in Abhängigkeit von der Froude-Zahl  $Fr_2$ , der dimensionslosen Schwellenhöhe  $w/y_2$  und einem Widerstandsbeiwert  $c_w$  beschrieben werden kann, wie in Gl. (4) angegeben.

$$\frac{\Delta y}{y_2} = c_w \cdot \frac{Fr_2^2}{2} \cdot \frac{w}{y_2} \quad (4)$$

Gl. 4 wurde über die Bernoullische Energiegleichung und die Kontinuitätsgleichung hergeleitet und ermöglicht die Beschreibung des Aufstaus  $\Delta y/y_2$  für beliebige Unterwasserstände  $y_2$ , Schwellenhöhen  $w$  und Abflüsse  $Q$ . Der  $C_w$ -Wert wurde so bestimmt, dass die quadratische Abweichung zwischen den Kurven und den Datenpunkten minimal ist. Die beste Approximation ergab sich für  $C_w = 1,3$ . Für die praktische Anwendung wurde ein Bemessungsdiagramm erstellt (Abbildung 7), in dem zusätzlich die Anwendungsgrenze für eine Jambor-Schwelle (Gl. 2) dargestellt ist.



**Abbildung 7:** Bemessungsdiagramm zur Ermittlung des durch eine Jambor-Schwelle verursachten Aufstaus  $\Delta y/y_2$  in Abhängigkeit von der Froude-Zahl  $Fr_2$  und der Schwellenhöhe  $y_2/w$

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe von systematischen Modelluntersuchungen konnten die Erkenntnisse von *Jambor (1959)* bestätigt werden. Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigte, dass der beschriebene Effekt maßgeblich vom Fließzustand auf der Schwelle abhängt und nur bei strömendem Abfluss auf der Schwelle funktioniert. Der „merkbarer Aufstau“ auf der Schwelle wurde quantifiziert und konnte durch eine semi-empirisch ermittelte Funktion beschrieben werden. Dem planenden Ingenieur ist es somit zukünftig möglich, den durch eine Jambor-Schwelle verursachten Aufstau mit Hilfe eines Bemessungsdiagramms zu ermitteln.

## Literatur

- DVWK, 1991: Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. In: DVWK-Merkblätter, Nr. 220.
- Bundesanstalt für Wasserbau (1960): Wehrschwelle für den Pegel Plochingen, Modelluntersuchungen in der Glasrinne (unveröffentlicht).
- Gebhardt, M. (2006): Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren. In: Mitteilungen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe, Heft 235.
- Gebhardt, M., Pfrommer, U., Belzner, F.; Eisenhauer, N.: 68 Jahre nach Jambor: Untersuchungen zum Einfluss einer Wehrschwelle, Wasserwirtschaft, Heft 9, S.14-19.
- Gebhardt, M., Pfrommer, U., Belzner, F.; Eisenhauer, N.: Studies on the backwater effect of a Jambor weir sill. Journal of Hydraulic Research (Under Review), 2012.
- Heimann, S. (2009): Betrachtungen zum Abfluss über ein breitkroniges Wehr. Erschienen in: WasserWirtschaft 99, Heft 12, S. 28-31.
- Jambor, F. (1959): Mögliche Erhöhung der festen Wehrschwelle sowie Gestaltung der damit verbundenen Wehrkonstruktion, im Besonderen des Sektorwehrs. Die Bautechnik, Heft 6 und 8 1959, Verlag Wilhelm Ernst und Sohn.
- Jirka, G., Lang, C. (2009): Einführung in die Gerinnehydraulik, Universitätsverlag Karlsruhe.
- Lauffer, H. (1936): Strömung in Kanälen mit gekrümmter Sohle, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Heft 19.
- Naudascher, E. (1992): Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke. 2. Auflage, Heidelberg: Springer-Verlag.

### Autoren:

Dr.-Ing. Michael Gebhardt  
Dipl.-Ing. (FH) Udo Pfrommer  
M.Eng. Fabian Belzner

Bundesanstalt für Wasserbau  
Referat W3  
Kussmaulstr. 17  
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726-0  
Fax: +49 721 9726-4540  
E-Mail: michael.gebhardt@baw.de  
udo.pfrommer@baw.de  
fabian.belzner@baw.de

Prof. Dr.-Ing. Norbert Eisenhauer

Hochschule Karlsruhe  
Versuchsanstalt für Wasserbau  
Moltkestr. 30  
76133 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9252619  
Fax: +49 721 925-2645  
E-Mail: norbert.eisenhauer@hs-  
karlsruhe.de